

WERYFIKACJA OPRACOWANEGO UKŁADU DO WYZNACZANIA WSPÓŁCZYNNIKA PRZEWODNOŚCI CIEPLNEJ MATERIAŁÓW

Andrzej MROWIEC

Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa im. Prezydenta Stanisława Wojciechowskiego w Kaliszu
tel.: 606 942 976, e-mail: a.mrowiec@pwsz.kalisz.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono udoskonalony układ pomiarowy do wyznaczenia współczynnika przewodności cieplnej ciał stałych i cieczy metodą „gorącego drutu” (rozwiązanie zgłoszono w Urzędzie Patentowym RP – nr P.425050). Do pomiaru przyrostu temperatury elementu grzejnego w funkcji temperatury badanego materiału wykorzystano autorski przetwornik różnicy temperatur z wyjściem napięciowym. Po wykonaniu kalibracji dla przyrostu temperatury $\Delta T = 3,2^{\circ}\text{C}$ pozwala on na przeprowadzanie badań eksperymentalnych w bardzo szerokim zakresie zmian temperatury otoczenia z dużą dokładnością pomiarową. Dla tak zbudowanego układu pomiarowego wykonano badania weryfikacyjne przy małych mocach grzania drutu grzejnego (z zakresu 0,18...1,23W) wykorzystując wodę destylowaną jako ciecz wzorcową.

Słowa kluczowe: metoda „gorącego drutu”, współczynnik przewodności cieplnej.

1. WPROWADZENIE

Badania właściwości cieplnych różnych materiałów stanowią dziedzinę wiedzy ważną dla analizy problemów związanych z wymianą ciepła w instalacjach technicznych. Z punktu widzenia przewodzenia ciepła szczególnie istotne znaczenie mają badania dotyczące możliwości wyznaczenia wartości współczynnika przewodności cieplnej λ . Znajomość tego współczynnika dla różnego rodzaju materiałów jest ważna w praktyce inżynierskiej, a także w badaniach eksperymentalnych. Obecnie wiele ośrodków badawczych zajmuje się poszukiwaniem nowych metod oraz udoskonalaniem już istniejących, które pozwolą na dokładniejsze wyznaczenie wartości współczynników λ [1].

Znane układy do eksperymentalnego wyznaczenia współczynnika λ wykorzystują metody statyczne i dynamiczne. Metody statyczne wyróżnia niezmiennosc pola temperatury w badanej próbce. Badania wykonuje się stosując ustalony przepływ ciepła z wykorzystaniem płyt równoległych (aparatus Poensgena jedno lub dwupłytowy). Podstawą dynamicznych metod pomiaru przewodności cieplnej materiałów jest na ogół teoria uporządkowanego strumienia ciepła wykorzystywana w metodzie „gorącego drutu” lub metodzie fal cieplnych [2].

Metoda „gorącego drutu” stosowana jest zarówno dla ciał stałych, jak i cieczy. Oparta jest ona na zjawisku nieustalonego przewodzenia ciepła i charakteryzuje się przy swojej prostocie stosunkowo dużą dokładnością, jak i względnie krótkim czasem pomiaru (całkowity czas pomiaru nie przekracza 60 s, podczas gdy dla metod statycznych

całkowity czas pomiaru wynosi kilka godzin). Ważną zaletą tej metody jest również to, że podczas pomiaru współczynnika przewodności cieplnej płynów umożliwia ona wyeliminowanie wpływu konwekcji. Uzyskuje się to dzięki temu, że strumień ciepła emitowany przez element grzejny jest stosunkowo mały, a czas pomiaru krótki [3, 4].

Metoda „gorącego drutu” polega na umieszczeniu w badanej próbce (ciało stałe lub ciecz) drutu o znanej rezystancji, przez który płynie prąd o stałym natężeniu ze stabilizowanego źródła napięcia. Ilość ciepła Q wydzielana na drucie oporowym („gorący drut”) jest równa ilości ciepła przepiętego przez badany materiał przy założeniu, że nie występują straty oraz pomija się akumulację tego ciepła w elemencie grzejnym. Przyrost temperatury w czasie mierzy się na drucie przy założeniu, że można pominąć jego małą średnicę w stosunku do długości. Wykonując dwa pomiary temperatury T odpowiednio w chwilach czasu t_1 i t_2 określa się wartość współczynnika przewodzenia ciepła λ z zależności (1):

$$\lambda = \frac{Q}{4 \pi L} \cdot \frac{\ln \frac{t_2}{t_1}}{\Delta T} \quad (1)$$

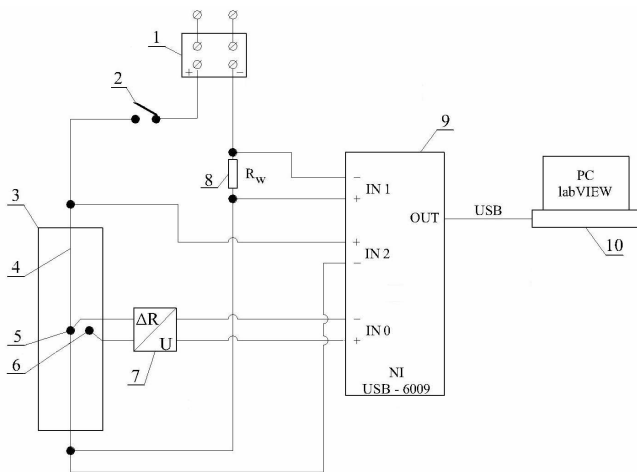
gdzie: Q - ilość ciepła emitowana przez źródło ciepła w jednostce czasu [W],
 L - długość elementu grzejnego [m],
 t - czas [s],
 ΔT - przyrost temperatury elementu grzejnego ($T_2 - T_1$) [$^{\circ}\text{C}$].

Zasadniczą wadą tej metody jest to, że przy badaniu próbek materiałów w szerokim zakresie zmian temperatury, związanej ściśle z temperaturą otoczenia (np. dla materiałów budowlanych zakres ten może wynosić $-20...+80^{\circ}\text{C}$), przetwornik pomiaru temperatury metodą „gorącego drutu” powinien być wykalibrowany w zakresie pomiarowym dodatkowo zwiększonym od dołu i góry o pewną wartość, na przykład o 4°C , w odniesieniu do przyjętego zakresu zmian temperatury otoczenia. W czasie pomiaru, przy dostarczaniu do elementu grzejnego mocy mniejszej od 1W, następuje bardzo mały przyrost temperatury drutu oporowego wynoszący poniżej 1°C . Dokładny pomiar tak małych przyrostów temperatury jest trudny. Istnieje możliwość zwiększenia dokładności mierzonego przyrostu temperatury drutu oporowego („gorącego drutu”), poprzez podzielenie

szerokiego zakresu temperatury otoczenia na dużo mniejsze przedziały, w których można przeprowadzać pomiar przewodności cieplnej. Dlatego dla każdego takiego nowego podzakresu pomiarowego należałoby wykonać, przed każdym pomiarem nową pracochłonną kalibrację całego układu pomiarowego. Dla pomiaru różnicy temperatur niezbędnej do wyznaczenia przewodności cieplnej, a przy tym uzyskania wysokiej dokładności pomiaru temperatury, zakres pomiarowy przetwornika nie powinien przekraczać 10°C . To przy małych mocach dostarczanych do „gorącego drutu” i małym przyroście temperatury poniżej 1°C zapewnia już pomiar z zadawalającą dokładnością.

2. BUDOWA UKŁADU POMIAROWEGO

Na rysunku 1 przedstawiono schemat udoskonalonego układu pomiarowego do wyznaczenia współczynnika przewodności cieplnej materiałów pozbawiony wymienionej wcześniej wady. W układzie tym wykorzystano wykonany przez autora pracy przetwornik różnicowy do pomiaru przyrostu temperatury elementu grzejnego w stosunku do temperatury badanego materiału i wykalibrowany na zakres pomiarowy $3,2^{\circ}\text{C}$. Pozwala on na wykonywanie eksperymentów w stosunkowo szerokim zakresie zmian temperatury otoczenia (np. w komorach klimatycznych).



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego do wyznaczenia współczynnika λ

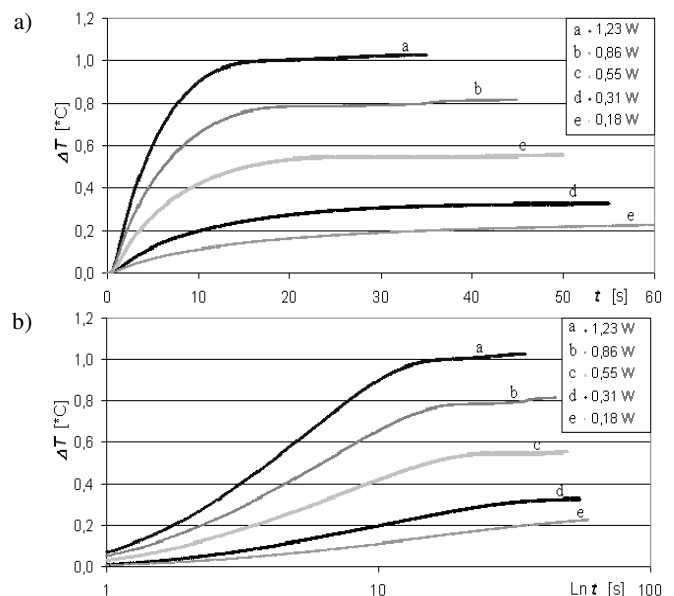
W badanej próbce (3) umieszczono element grzejny (4) w postaci emaliowanego drutu oporowego (o średnicy $0,2\text{ mm}$) o znanej długości, do którego przymocowano na stałe małego barytowego rezystancyjny czujnik temperatury (5). W tej samej próbce, jako element odniesienia pomiaru temperatury badanego materiału, umieszczono drugi taki sam rezystancyjny czujnik temperatury (6). Czujnik ten umieszczono w takiej odległości od elementu grzejnego, aby nie występowało oddziaływanie strumienia ciepła pochodzącego od drutu oporowego na drodze przewodzenia lub konwekcji w cieczy. Chodziło o to, aby te dwa zjawiska można było pominąć. Sam element grzejny zasilany jest poprzez włącznik (2) z stabilizowanego źródła napięcia stałego (1), co przy stałym oporze drutu rezystancyjnego zapewnia dopływ stałego strumienia ciepła. Sygnały z czujników rezystancyjnych w układzie mostkowym wprowadzono na wejście różnicowe wzmacniacza operacyjnego przetwornika temperatury z wyjściem napięciowym (7). W układzie pomiarowym, przed podaniem zasilania na element grzejny, temperatury czujników (5) i (6)

są jednakowe, a zatem wartość napięcia wyjściowego z przetwornika różnicowego temperatury równa jest zeru. Mierzy on przyrost temperatury w stosunku do aktualnej temperatury badanego materiału, co pozwala na wykalibrowanie przetwornika dla małego przyrostu temperatury (np. $3,2^{\circ}\text{C}$), dzięki czemu może być wykorzystywany w szerokim zakresie zmian temperatury badanego materiału (temperatury otoczenia). Zakres ten może ograniczać tylko dopuszczalna temperatura zastosowanych czujników temperatury lub przewodów doprowadzających sygnały do różnicowego przetwornika temperatury (7). Układ pomiarowo-rejestrujący składa się z: komputera PC (10) wyposażonego w oprogramowanie pomiarowe i sterowniki *NI-DAQmax* i *NI-labVIEW*, które połączono poprzez złącze RS-232 z 14-bitowym przetwornikiem A/C typu NI USB-6009 (9). Na wejściach do tego przetwornika podłączono:

- IN0 – wyjście napięciowe z różnicowego przetwornika temperatury (7) – pomiar przyrostu temperatury elementu grzejnego („gorącego drutu”) do temperatury badanej próbki;
- IN1 – napięcie „odłożone” na rezystorze wzorcowym 100Ω (8) – pomiar prądu przepływającego przez element grzejny („gorący drut”);
- IN2 – napięcie występujące na zaciskach drutu grzejnego (4) – pomiar napięcia na zaciskach elementu grzejnego („gorącego drutu”).

3. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

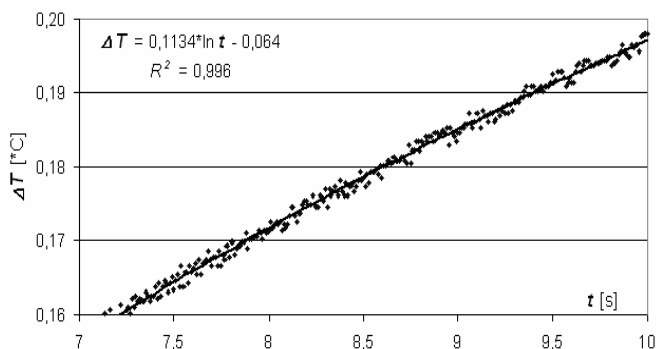
W celu weryfikacji zbudowanego układu pomiarowego (rys. 1) przeprowadzono badania porównawcze. Badania te prowadzono w temperaturze otoczenia ($21 \pm 1^{\circ}\text{C}$) dla wody destylowanej o znanej wartości współczynnika przewodności cieplnej (literaturowy współczynnik $\lambda = 0,61\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$).



Rys. 2. Wykresy przyrostu temperatury drutu grzejnego w funkcji czasu dla wody destylowanej przy wybranych mocach grzania: a) $\Delta T = f(t)$, b) $\Delta T = f(\ln t)$

Wyniki pomiarów przyrostów temperatury drutu grzejnego („gorącego drutu”) w funkcji czasu dla pięciu różnych mocy grzania przedstawiono w postaci graficznej na rysunku 2. Z przebiegów tych wynika, że czas pomiaru nie

przekracza 60s dla mocy grzania 0,18 W, a dla mocy grzania 1,23W zmniejsza się do 25 s, dzięki czemu uzyskuje się największy przyrost temperatury drutu grzejnego ΔT przekraczający nieznacznie 1°C. Liniowo narastające fragmenty charakterystyk, przedstawionych w układzie $\Delta T - \ln t$ na rysunku 2b), posłużyły do obliczenia współczynnika przewodności cieplnej λ . Na rysunku 3 przedstawiono liniowy fragment charakterystyki (rys. 2b) dla mocy grzania drutu grzejnego wynoszącej 0,31 W. Uzyskane w ten sposób wyniki obliczeń wartości λ (średnia z trzech pomiarów) wraz z wartością literaturową dla wody destylowanej przy wybranych wartościach mocy grzania przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 3. Przyrost temperatury w funkcji czasu przy zadanej mocy grzania 0,31 W

W celu weryfikacji tak udoskonalonego stanowiska pomiarowego, na podstawie zależności (1) obliczono wartości współczynnika przewodności cieplnej λ dla wody destylowanej przy wybranych mocach grzania z zakresu 0,18...1,23 W. W obliczeniach przyjęto przedziały czasowe ($t_2 - t_1$) odpowiadające liniowej charakterystyce z układu $\Delta T - \ln t$ (rys. 2b) wraz z odpowiadającymi im przyrostami temperatury ΔT . Uzyskane w ten sposób wyniki obliczeń wartości λ (średnia z trzech pomiarów) przy wybranych wartościach mocy grzania drutu oporowego wraz z porównaniem do nominalnej wartości literaturowej dla wody destylowanej ($\lambda=0,61$ W/(m·K)), przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyznaczone wartości współczynnika λ wody destylowanej przy różnych wartościach mocy grzania drutu grzejnego i porównanie z wartością nominalną ($\lambda=0,61$ W/(m·K))

Moc grzania drutu [W]	Wybrany przedział czasu [s]	Wartość współczynnika λ [W/(m·K)]	$\Delta\lambda/\lambda$ [%]
0,18	11,0...15,0	0,5786	-5,15
0,31	7,50...9,50	0,5971	-2,11
0,55	6,25...9,00	0,5766	-5,48
0,86	5,25...8,25	0,5717	-6,28
1,23	4,33...6,66	0,6005	-1,56

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Otrzymane wyniki wartości współczynnika przewodności cieplnej λ dla wody destylowanej na udoskonalonym stanowisku pomiarowym potwierdzają przydatność przyjętej metody „gorącego drutu” do badań materiałów.

Podczas wstępnej weryfikacji układu pomiarowego dla wody destylowanej stwierdzono że:

1. W przebadanym zakresie mocy grzania drutu grzejnego występuje jednostronne rozproszenie wyników (wyniki pomiarów są zaniżone w stosunku do wartości referencyjnej $\lambda = 0,61$ W/(m·K)).
2. Błąd względny z porównania eksperymentalnych wartości współczynnika przewodności cieplnej do wartości literaturowej nie przekracza -6,28% (norma ASTM D2717 dopuszcza błąd względny do 10%).

5. BIBLIOGRAFIA

1. Monchau J. P., Lalanne N., Ibos L.: Measurement of the thermal conductivity of liquids by hot wire method: comparison between transient and stationary approaches. 18th International Congress of Metrology, 06003(2017), DOI: 10.1051/metrology/201706003.
2. Fodemski T.R: Pomiar ciepłoty, Część 1, Podstawowe pomiary cieplne, WNT, Warszawa 2007.
3. Heim D., Mrowiec A., Prałat K.: Zastosowanie stanowiska badawczego małych mocy do pomiarów przewodności cieplnej cieczy o gęstości większej od wody, „Inżynieria i Aparatura Chemiczna” nr 1/2014, 53, s. 21-22.
4. Heim D., Mrowiec A., Prałat K.: Analysis and interpretation of results of thermal conductivity obtained by the Hot Wire Method, Experimental Techniques, 2016, Volume 40, ISSN: 0732-8818, pp. 513-51.

VERIFICATION OF A SYSTEM FOR DETERMINING THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENT OF THE MATERIALS

Improved measuring system by „hot wire” method for determination of thermal conductivity coefficient for the solid bodies and fluids was presented in this article. In this system, original (patent application) differential converter for measurement of temperature rise of a heating element compared to temperature of an examined material was used. Calibrating to the measuring range $\Delta T = 3,2^\circ\text{C}$ enables to conduct experimental research in a very wide range of the changes of ambient temperature (e.g. in the climatic chambers, in which we can get the change of temperature within the range between -20°C and $+80^\circ\text{C}$). Verification research in the ambient temperature ($21 \pm 1^\circ\text{C}$) with selected powers of heating up a heating wire between 0,18 and 1,23 W was conducted for such measuring system. Distilled water of the value of literature thermal conductivity coefficient $\lambda = 0,61$ W/(m·K) was used for the research. An error from comparison of obtained experimental values of thermal conductivity coefficient with values provided in literature, in the examined scope, does not exceed -6,28%.

Keywords: „hot wire” method, thermal conductivity coefficient.

